

LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL TERRITORIO ESPAÑOL

ACUÍFEROS DETRÍTICOS COSTEROS DEL LITORAL MEDITERRÁNEO PENÍNSULAR: VALLE BAJO Y DELTA DEL LLOBREGAT

Coastal detrital aquifers in the peninsular Mediterranean littoral: Llobregat's lower valley and delta

Emilio Custodio (*)

RESUMEN

El valle bajo y delta del río Llobregat constituye un sistema acuífero de primordial importancia para el Área Metropolitana de Barcelona para garantizar el suministro de agua para población, industria y agricultura. También es un área que aún contiene humedales de interés situados próximos a la costa. El sistema acuífero consiste en un acuífero aluvial libre en el valle bajo, el cual en el delta queda dividido en dos por una cuña de limos y arcillas de deposición marina, la cual aún conserva parte del agua salada de formación. Hasta finales del siglo XIX el sistema estaba en estado casi natural, pero desde entonces se le ha sometido a bombeos crecientes, en especial en las décadas de 1960 y 1970, lo que ha ocasionado la pérdida de la surgencia inicial de agua subterránea del acuífero profundo del delta, un gran descenso generalizado de niveles, el paso del río de ganador a perdedor en el valle bajo, intrusión marina y una importante reducción de los humedales. Además se ha producido salinización a través de las aguas del río contaminadas por vertidos salinos mineros, y una serie de focos de contaminación periurbana, industrial y agrícola. La Administración del agua empezó estudios y actuaciones en la década de 1960, y los usuarios, en su mayoría abastecedores e industriales, para conservar y hacer sustentables los beneficios derivados de la explotación del sistema acuífero crearon una comunidad de usuarios, que ha ido afianzándose y ayudando decididamente al control y gestión. Hay una buena tradición de recarga artificial para incrementar los recursos.

ABSTRACT

The Llobregat river lower valley and delta form an aquifer system of primordial importance for the Barcelona's Metropolitan Area in order to guarantee the water supply to population, industry and agriculture. It is also an area that has interesting wetlands placed near the coast. Along the lower valley there is an alluvial water-table aquifer, which in the delta divides in two by means of an intercalated silt and clay wedge, which was deposited in a marine environment and still conserves part of the marine water. Until the end of the 19th century the system was in an almost natural state, but from that time it has been subjected to increasing pumpage, especially in the 1960's and 1970's. The consequences has been the disparition of flowing wells in the delta deep aquifer, a conspicuous groundwater level drawdown, the conversion of the river from effluent to influent along the lower valley, marine intrusion and an important reduction of wetland surface area. Furthermore there is salinization through the river water, which is contaminated by the disposal of mine brines upstream, and a series of periurban, industrial and agricultural contamination foci. The Water Administration studied and started actions in the 1960's, and the water users, mostly suppliers and factories, in order to preserve and make sustainable the benefits derived from groundwater development from the aquifer system formed a User's Association, that has been consolidating and definitively helping in the control and management. There is a good artificial recharge tradition to increase resources.

Palabras clave: acuíferos costeros, recursos hídricos subterráneos, evolución, Llobregat, Barcelona.

Keywords: coastal aquifers, groundwater resources, evolution Llobregat, Barcelona.

(*) Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, Campus Nord, Edificio D2, Gran Capità s/n. 08034 Barcelona, emilio.custodio@upc.edu. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Real Acad. Ciencias Exac. Fis. Nat. (España)

INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO GENERAL

Las formaciones costeras cuaternarias, en especial los deltas fluviales, pueden contener sedimentos permeables saturados de agua –acuíferos– bien conectados a los ríos que los originaron. Si las condiciones hidrodinámicas han permitido desplazar las aguas marinas de la parte de sedimentos depositados en ambiente salino y salobre, se convierten en importantes fuentes de agua dulce para las poblaciones y actividades humanas próximas, a pesar de la pequeña extensión superficial, en muchos casos, y siempre y cuando se limite la posible intrusión marina. Tal es el caso del conjunto del delta y valle bajo del río Llobregat, situado en el área metropolitana de Barcelona (Fig. 1), que tiene una población que se acerca a 4 millones de habitantes, con importantes actividades industriales, de servicios y de transporte (aeropuerto, puerto, carreteras, ferrocarriles) además de subsistir una agricultura intensiva allí donde la urbanización está contenida.

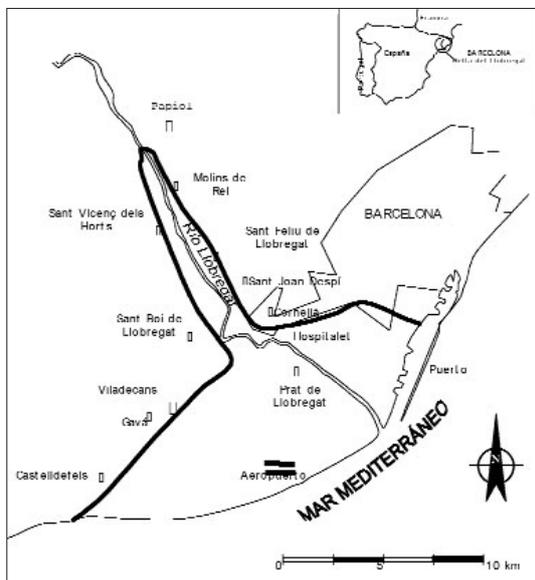


Fig. 1.– Mapa de situación general.

Se dispone de estudios geológicos e hidrogeológicos del área desde finales del siglo XIX (Solé–Sabarís, 1957; Santa María y Marín, 1910; estudios varios de los pozos artesianos) pero no se tienen estudios de mayor detalle con apoyo de sondeos hasta la década de 1960 (MOP, 1966; Llamas y Mollist, 1967). Los trabajos posteriores son numerosos, tanto en cuanto a la geología (Marqués, 1975, 1984; Checa, et al., 1988; Simó et al., 2005), hidrogeología (PHPO, 1985; Manzano et al., 1986, 1987), modelación numérica (REPO, 1971; Cuena y Custodio, 1971; Iribar et al., 1997; Vázquez–Suñé et al., 2006), hidrogeoquímica e isotopía ambiental (Custodio 1967, 1968, 1971) y análisis del funcionamiento e intrusión marina (Peláez, 1983; Manzano, 1993, 1992; Bayó et al., 1977; Custodio, 1981, 1987, 2002), con un reciente trabajo de gran detalle (Gámez, 2007) que incluye la parte submarina apoyándose en la geofísica marina existente y en sonde-

os profundos recientes en relación con la ampliación del puerto de Barcelona, extensión del ferrocarril metropolitano, túneles ferroviarios y obras singulares (estación depuradora de aguas residuales de Despurbaix, desvío del tramo final del Llobregat, ...).

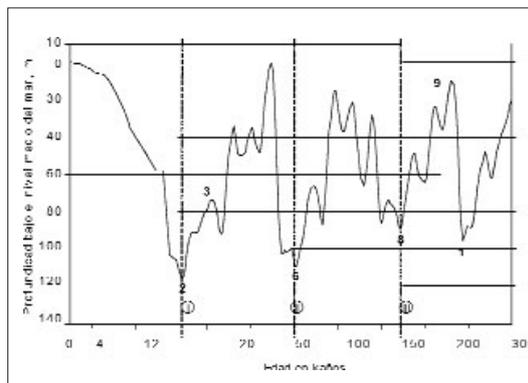


Fig. 2.– Oscilaciones del nivel del mar durante el Cuaternario, respecto al nivel medio actual (simplificado de Gámez, 2007). Los números son las etapas isotópicas y los números romanos dentro de un círculo los mínimos que corresponden al delta del Llobregat.

EL MEDIO FÍSICO

Los deltas, y en especial los mediterráneos, son el resultado de las fluctuaciones del nivel del mar a lo largo del Cuaternario, con episodios de descenso de más de 100 m respecto a la actual posición (Fig. 2), que es próxima a los valores máximos. La erosión fluvial en época de niveles bajos crea un espacio que después será rellenado por aportes terrígenos si estos son lo suficientemente abundantes. Cada fluctuación supone un periodo de erosión (excavación) que destruye todo o parte de lo anteriormente construido, para ser de nuevo rellenado. El proceso deja buenos restos si la zona costera es subsidente (se hunde) por efecto tectónico. Tal es el caso del delta del Llobregat, que es una de las formaciones deltaicas costeras más completas y mejor conocidas, a pesar de su pequeña extensión subaérea, unos 50 km² de delta propiamente dicho, a lo largo de 12 km de costa.

El aporte de sedimentos fluviales, frecuentemente arcillas, limos y arenas, en el caso del Llobregat incluye gravas dado la notable pendiente de su cuenca y la importancia de los eventos torrenciales (Llasat et al., 2005; Barriando y Martín–Vide, 1998; Codina, 1971). Los materiales más groseros se depositan en el valle bajo y proximidades de la costa, y a medida que se entra en el tramo final del río y en el mar se depositan primero sedimentos arenosos, luego limosos y finalmente arcillosos. La variación del nivel de mar, que supone una variación de la línea de costa y en un mar con mareas pequeñas, como es el Mediterráneo, comporta un apilamiento de materiales. Partiendo de un mínimo del nivel del mar, sobre la superficie de erosión se depositan materiales groseros, que a medida que la costa retrocede se hacen cada vez más finos

hasta llegar a arenas finas, limos y arcillas. Cuando el mar se estabiliza en una posición alta, y el espacio costero ha sido rellenado, se forma una amplia llanura aluvial costera que contiene gravas y arenas del cauce divagante del río, arenas eólicas, depósitos finos de inundación de crecidas del río y sedimentos de relleno de las posibles lagunas que se forman tras barras arenosas costeras de origen eólico y litoral combinado. Pueden existir varios deltas superpuestos, si no han sido erosionados, y en posiciones diferentes.

Normalmente, como sucede en el delta y valle bajo del Llobregat, dominan los sedimentos más recientes, que se apilan sobre la última superficie de erosión y que consisten de abajo arriba en gravas y arenas depositadas con la costa alejada respecto a la posición actual por ser bajo el nivel del mar, seguido de arenas finas, limos y arcillas tras subir rápidamente el nivel del mar y retirarse la línea de costa hacia el interior, y finalmente los depósitos de gravas, arenas y limos del delta actual, cubiertos en el

delta y valle bajo por sedimentos limoso-arcillosos de llanura de inundación por crecidas del río.

En la figura 3 se muestra el esquema clásico en forma de corte litológico longitudinal, en el que se aprecian los niveles groseros profundos, más o menos continuos según la posición del río, pero no necesariamente continuos a lo largo de la costa, la cuña de limos y arcillas intermedios que no llegan al valle bajo y bordes del delta, y las formaciones superiores variables del delta actual. A la figura se añade la interpretación según la sedimentología de secuencias (Gámez, 2007), con las diferentes superficies de erosión que corresponden a los varios mínimos del nivel del mar, y la extensión más allá de la actual línea de costa.

LOS ACUÍFEROS

Las formaciones geológicas permeables saturadas de agua son los acuíferos, que en el valle bajo y delta del Llobregat son los niveles de gravas y are-

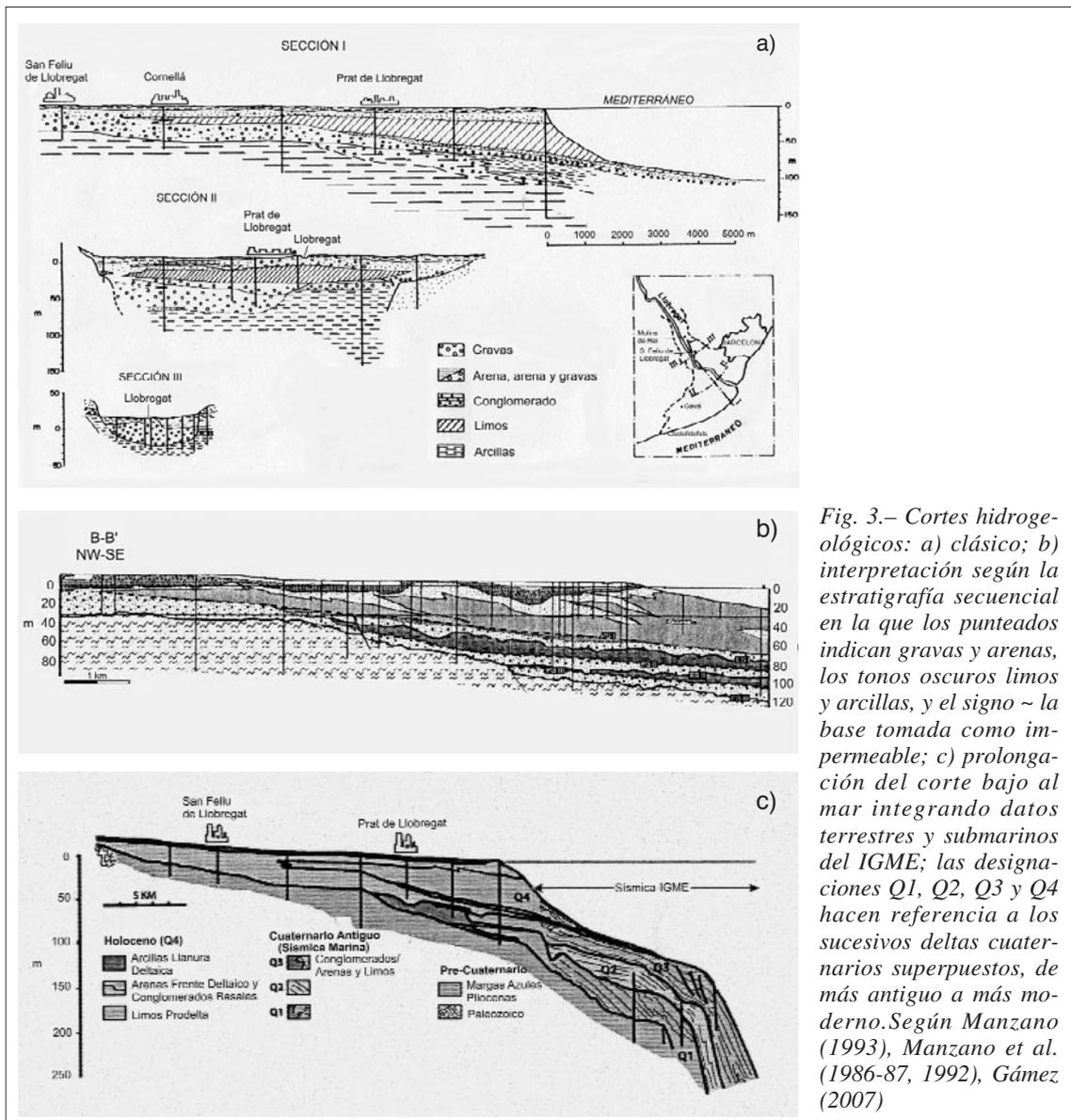


Fig. 3.- Cortes hidrogeológicos: a) clásico; b) interpretación según la estratigrafía secuencial en la que los punteados indican gravas y arenas, los tonos oscuros limos y arcillas, y el signo ~ la base tomada como impermeable; c) prolongación del corte bajo al mar integrando datos terrestres y submarinos del IGME; las designaciones Q1, Q2, Q3 y Q4 hacen referencia a los sucesivos deltas cuaternarios superpuestos, de más antiguo a más moderno. Según Manzano (1993), Manzano et al. (1986-87, 1992), Gámez (2007)

nas. Las arenas finas y limos se comportan como acuitardos (contienen agua pero ésta se mueve muy lentamente) y las arcillas (acuicludo) son impermeables a efectos prácticos a medio y largo plazo, aunque también contienen agua, en buena parte salina.

Según la descripción física (Fig. 3) el valle bajo del Llobregat es un acuífero aluvial libre (a presión atmosférica en su superficie) formado por varias terrazas fluviales que al llegar al delta, en Cornellà, se divide en dos, separados por una cuña de limos (acuitardo y acuicludo con espesor creciente hacia la costa), uno de poca profundidad (acuífero superior) que cubre gran parte del delta, y otro profundo, bajo la cuña de limos, que por lo tanto queda confinado (la presión del agua en su techo es mayor que la atmosférica), y que es el acuífero importante del delta. No es continuo sino variable lateralmente, con espesores que decrecen desde unos 40 m final del valle bajo hasta menos de 10 m en la costa, que se adegaza aún más mar adentro y que toma contacto con los sedimentos de fondo marino a una distancia de unos 4 km en el centro del delta.

Bajo el acuífero profundo hay todavía otros niveles permeables correspondientes a restos de deltas anteriores, localizados, menos permeables, poco conocidos en detalle, y que parecen tener poca relevancia en el funcionamiento general de las aguas subterráneas.

EXPLOTACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Hasta finales del siglo XIX apenas había explotación de agua subterránea. Se limitaba a pozos con norias en el valle bajo para el riego, de espacios no servidos por los canales de riego a un lado y otro del río Llobregat, construidos poco antes, y a un conjunto de canales de drenaje (correderas) en el sector oeste del delta para abatir un poco los niveles freáticos y facilitar el cultivo de los campos encharcadizos, además de conducir al mar las aguas de tormenta.

Hacia finales del siglo XIX se construyeron pozos para el abastecimiento de Barcelona en el tramo final del valle bajo (Cornellà-Sant Joan Despí). Se trataba de pozos de gran diámetro, con una infraestructura metálica para albergar y soportar las voluminosas bombas verticales de pistón accionadas desde la superficie por potentes máquinas de vapor, todo ello dentro de un recinto estanco sumergido.

Al mismo tiempo se descubrió que los pozos profundos, construidos a percusión en la población de Prat de Llobregat, en el centro del delta, eran surgentes ("artesianos"), es decir que al penetrar el acuífero profundo el agua fluía al exterior, pudiendo alcanzar varios metros sobre el terreno, con caudales de varios L/s (Ferret, 2006; Santa María y Marín, 1910). Este hecho permitió abastecer con agua dulce de buena calidad a esa población, que hasta entonces tenía serios problemas de cantidad y calidad del agua. Después construyeron muchos otros pozos surgentes para usos urbanos, rurales e

industriales, y poco a poco la surgencia fue disminuyendo hasta cesar. Para paliarlo se instalaron bombas de pistón de accionamiento eléctrico (grupo electrógeno o red), y se desaceleró la construcción de más pozos.

Posteriormente se introdujo la bomba centrífuga sumergible capaz de caber en un sondeo de reducido diámetro, perforable con máquina. Los pozos de abastecimiento a Barcelona de Cornellà-Sant Joan Despí se electrificaron y se construyeron otros nuevos, con extracción de agua subterránea casi continua. También en Prat de Llobregat, margen izquierda del delta y áreas periféricas del delta se instalaron industrias de gran demanda de agua (fibras artificiales, papel, químicas, automoción), en las décadas de 1950 y 1960, con pozos eficientes, capaces de bombear varias decenas de L/s cada uno, y se inició una extracción intensiva del agua subterránea, que dura hasta la actualidad, aunque ha sido disminuyendo paulatinamente. En la década de 1970 se llegó a una extracción total en el valle bajo y delta de hasta 120 hm³/año, una enorme cantidad para un área pequeña, pero que en la actualidad se reduce a unos 50 hm³/año (Fig. 4).

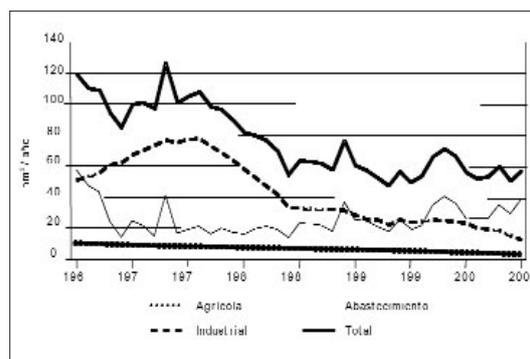


Fig. 4.- Evolución de las extracciones del sistema acuífero del Baix Llobregat, según la CUADLL.

Con la construcción en 1962 de una planta de potabilización del agua del río Llobregat para el abastecimiento de Barcelona, los pozos de Cornellà-Sant Joan Despí, y otros en el valle bajo, quedaron como complemento en épocas de sequía, o de mala calidad del agua fluvial, o de avería en las instalaciones, lo que supone años de escaso bombeo y otros de bombeo intenso. Es una forma de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas (Llamas, 1969; Custodio et al., 1977). La figura 5 muestra las superficies piezométricas en una época de explotación intensiva.

En el delta el descenso de niveles del agua en los pozos supuso un encarecimiento del agua extraída, pero en especial una penetración de agua marina al acuífero profundo. La consecuencia ha sido el abandono de muchos pozos y cada vez mayores esfuerzos para ahorrar en el uso de agua subterránea, lo cual explica la reducción progresiva de las extracciones antes indicada, propiciada además por

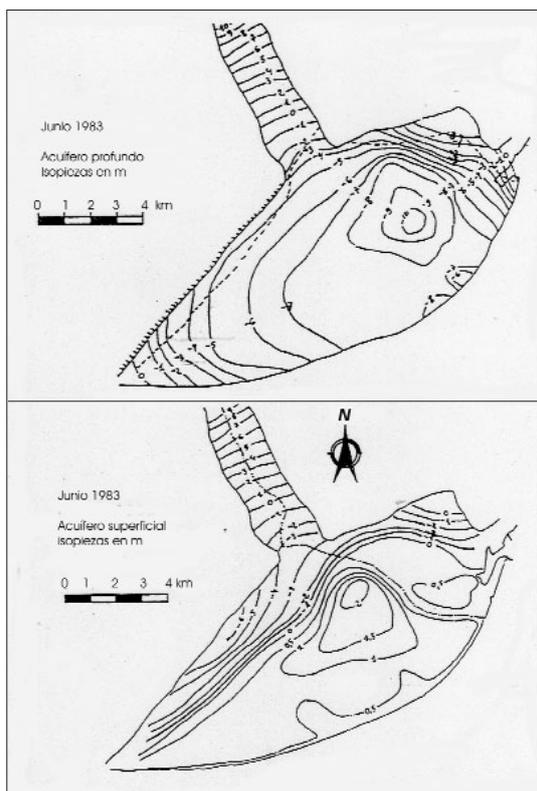


Fig. 5.— Superficies piezométricas de junio de 1983, época de explotación intensiva, en la mitad inferior del valle bajo y delta. A.— acuífero profundo, que muestra la gran depresión creada en el entorno de Prat de Llobregat, que se extiende valle arriba, donde el río queda colgado; la línea de trazos es el límite del área confinada. B.— acuífero superficial. Los valores en el valle bajo coinciden en ambas figuras al ser el acuífero único.

cambios en el tipo de industria y la toma de conciencia de los usuarios de que para un uso sustentable del acuífero hay que limitar las extracciones. En ello ha tenido una especial relevancia los esfuerzos de la Administración pública del agua y la creación de una Comunidad de Usuarios de Agua Subterránea, como se comentará más adelante.

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL BAIX LLOBREGAT

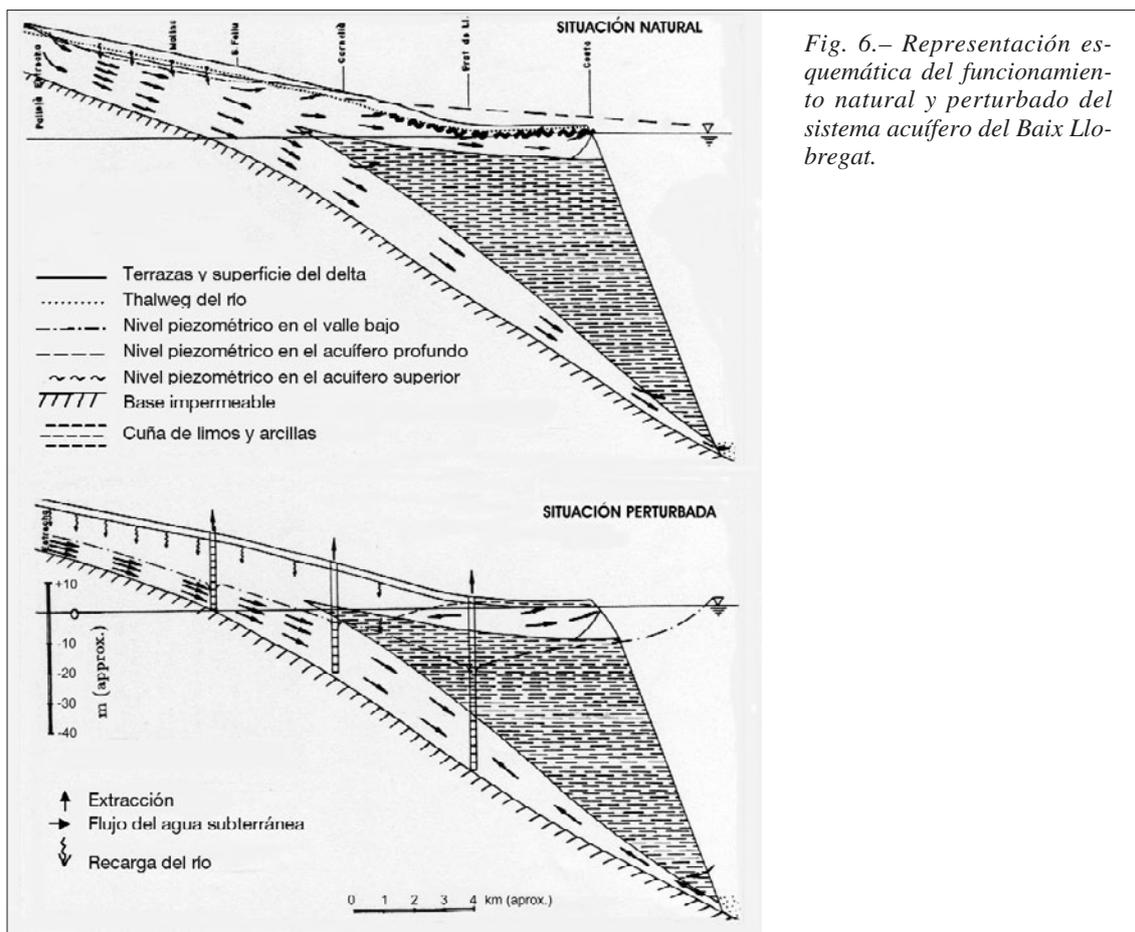
El sistema acuífero del Baix Llobregat es el conjunto de acuíferos y acuitardos del valle bajo y delta del Llobregat. Antes del inicio del siglo XX estaba en estado casi natural. En esta situación el río era ganador (recibía aportes de agua subterránea) a lo largo del valle bajo procedente de recarga por la lluvia a las terrazas altas y cuencas laterales al acuífero, además de las escorrentías de los pequeños tributarios en ese tramo y de la infiltración de los excedentes de riego con agua de canales que toman agua del río. La descarga se hacía principalmente al llegar al delta, con áreas de manantiales difusos y encharcamientos. La recarga del acuífero

superior del delta se producía de manera similar, dando origen a la alimentación de humedales y lagunas costeros.

La situación en el acuífero profundo es diferente de la de otros deltas, como el delta del Ebro (donde la cota del río al inicio del delta de ~0,5 m). La cota del río al inicio del delta del Llobregat es de unos 11 m, que excede a lo que hace falta para contrarrestar la presión del agua marina más densa donde aflora en el fondo marino (Custodio 1987, 2002). Eso ha permitido durante varios miles de años un cierto flujo de agua subterránea desde el valle bajo hacia el afloramiento submarino, que en buena parte había desplazado el agua marina inicial, lavando el acuífero profundo. Eso explica que el agua de éste acuífero fuera dulce en buena parte del delta, a diferencia de otros deltas, como el del Ebro. Distribuyendo esa cota de unos 11 m en Cornellà y los aproximadamente 2,5 m necesarios en la descarga submarina, resultan niveles piezométricos notablemente por encima de la altitud del terreno del delta, lo que explica que los primeros pozos profundos fuesen surgentes.

Con la explotación intensiva de los acuíferos, la situación cambió drásticamente. La situación en la década de 1970, que es similar a la actual pero más acusada, supone notables descensos del nivel del agua subterránea a causa de los bombeos. Las extracciones en el valle bajo y la transferencia subterránea de agua al acuífero profundo del delta hacen que el acuífero del valle bajo se separe del río, el cual queda colgado por encima del nivel freático, hasta 15 m, y la infiltración de agua del río pasa a realizarse a través del medio no saturado (ver el esquema de la figura 6). La recarga principal procede de esa infiltración de agua del río, variable a lo largo del año, y de la infiltración de excedentes de riego en los campos de cultivo donde se aplican altas dotaciones de riego. Esta última ha ido disminuyendo por mayor ocupación del territorio (población, vías de comunicación, instalaciones) con lo que los aportes laterales han aumentado su importancia relativa. Las fluctuaciones de nivel a lo largo del año y de un año a otro son importantes, de varios metros, lo que supone una variación del agua almacenada en el acuífero (esencialmente en el valle bajo, aunque también en las franjas laterales), de alrededor 10 hm³ por m de cambio de nivel. Así el conjunto actúa a modo de embalse con capacidad reguladora de hasta 150 hm³ (Vilaró, 1967; Custodio y Llamas, 1976, 1983; Custodio, 1983).

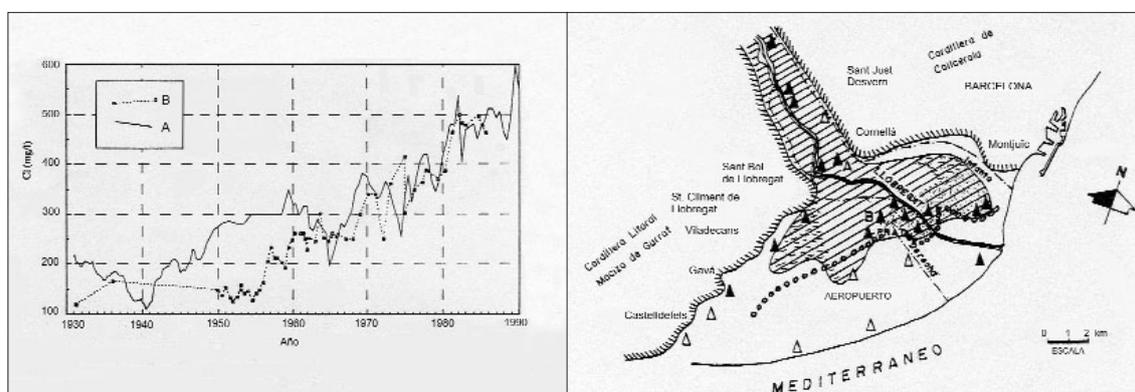
La situación en el acuífero superior del delta ha cambiado menos al no existir extracciones significativas de agua subterránea para riego y abastecimiento, pero se está modificando a causa de los notables drenajes en relación con las infraestructuras enterradas y las pistas del aeropuerto. Los túneles ferroviarios en construcción pueden además llegar a convertirse en barreras al flujo, con niveles freáticos diferentes a un lado y otro. Actualmente las lagunas y áreas encharcadizas costeras, de importancia ecológica, han mermado por diferentes causas, entre ellas las de menor aporte de agua subterránea, lo cual hace variar sus características químicas y de



salinidad, y se requiere la adopción de medidas adecuadas de protección.

En el acuífero profundo, cuyas extracciones están principalmente localizadas en el centro del delta, se produjo un extenso cono de descensos piezométricos (no de vaciado del acuífero por ser éste cautivo), como muestra la figura 5, lo que fuerza la recarga de aguas desde el acuífero superior a lo largo de los bordes del delta (y el correspondiente descenso de los niveles freáticos en el acuífero superior en esos lugares)

res) y sobre todo a la llamada de agua del acuífero del valle bajo hacia el centro del delta (Fig. 7) y también a la llamada de agua marina desde el afloramiento submarino también hacia el centro del delta, con la consiguiente salinización de muchos pozos. El que parte de estos pozos se mantenga en funcionamiento (usos de refrigeración, recientemente alimentación de plantas desalinizadoras de aguas salobres) evita que las aguas salinas se extiendan más de lo que lo hacen. En la figura 8 se muestra el esquema de los diferentes aportes y descargas.



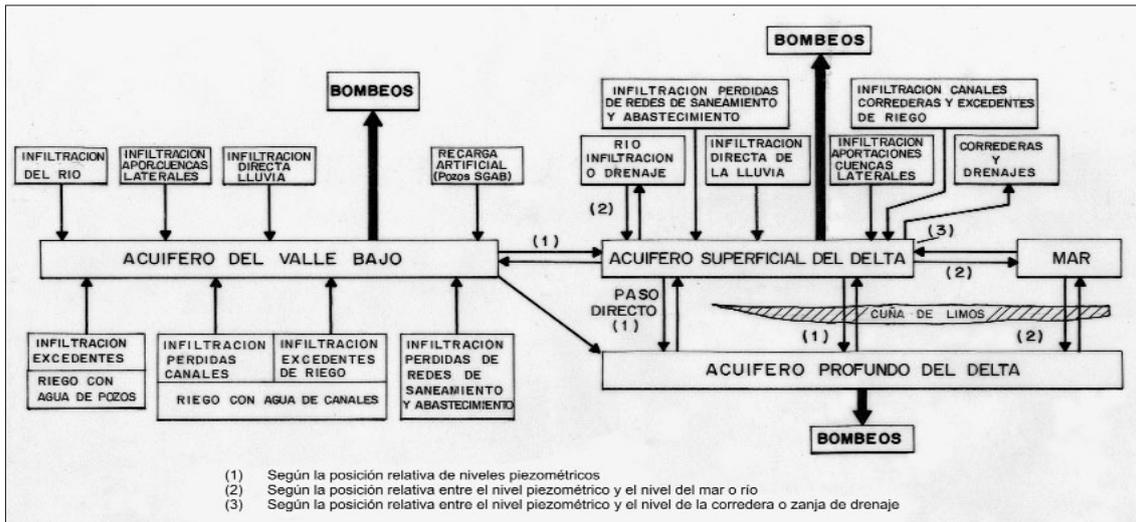


Fig. 8.- Esquema de las entradas y salidas de agua del sistema acuífero del Baix Llobregat.

CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En general las aguas subterráneas del sistema acuífero del delta del Llobregat eran inicialmente de buena calidad química y bacteriológica. Cabe mencionar como excepciones restos de aguas salinas en el sector oeste del delta, de muy baja elevación, y las aguas salinas y marinas atrapadas en la cuña de limos, pero prácticamente inmóviles a corto plazo. También las aguas recargadas en superficies vegetadas, y sobre todo en las áreas de riego intensivo, son duras a muy duras a causa de la elevada presión parcial de CO₂ en la atmósfera del suelo y la naturaleza calcárea del medio, hasta el punto de producir serias incrustaciones de calcita en las conducciones y acumular CO₂ en el fondo de pozos de gran diámetro. En el acuífero superior del delta la calidad era peor a causa de la presión poblacional y agrícola. En el acuífero profundo, cerca de la costa, las aguas podrían ser bicarbonatadas sódicas por intercambio iónico y reductoras (alto Fe, CH₄ disuelto, bajo SO₄).

Con la explotación intensiva se han ido produciendo modificaciones importantes, entre ellas la ya comentada progresiva intrusión marina en el acuífero profundo del delta (fig. 9), hasta límites que deja el agua inútil para cualquier uso salvo la refrigeración, y recientemente para desalinización por ósmosis inversa. La notable contribución a la recarga del río a lo largo del valle bajo ha ido substituyendo agua natural por agua fluvial infiltrada, pero el agua de dicho río era salobre a causa de vertidos salinos en su cuenca media por las explotaciones mineras de sales potásicas, situación que después fue mejorando con la recolección de las salmueras producidas en salmueroductos (de las minas y de industrias singulares). Hoy la situación ha mejorado notablemente pero aún la salinidad es alta. Todo esto se refleja en el agua de los acuíferos, tanto los que reciben recarga fluvial como los que reciben excedentes de riego a partir de los canales que se alimentan del río o de aguas fluviales usadas. Sin embargo por ahora no hay problemas serios de NO₃ (se reduce en el acuífero profundo del delta), mode-

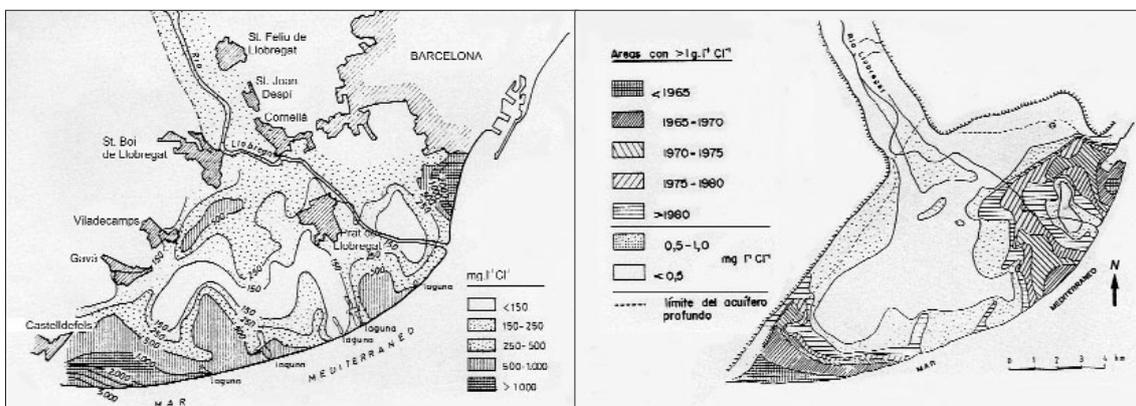


Fig. 9.- Contenido en cloruro (en mg/L) del agua del acuífero profundo y del valle bajo inferior en 1965 (figura izquierda) y progresivo avance de la salinización marina hasta después de 1980 (figura derecha). Ha seguido penetrando, pero más lentamente.

rados de NH_4 , y por ahora no se llega a un medio lo suficientemente reductor como para disolver grandes cantidades de Fe, aunque esto sí sucede en aluviales aguas arriba. La posible contaminación por plaguicidas agrícolas i contaminantes emergentes se ha detectado y se está midiendo, pero faltan estudios de detalle.

La contaminación industrial puede ser localmente importante, en especial por el enterramiento de unas 300.000 toneladas de cromitas residuales con cromo hexavalente en las décadas de 1960 y 1970. También lo es por vertidos de disolventes organoclorados, de modo que los pozos de abastecimiento han tenido que tratar el agua por arrastre de aire y oxidación intensa antes de servirla, en especial en Prat de Llobregat.

Otra faceta de la contaminación es la producida por el depósito de basuras urbanas en excavaciones de extracción de gravas y arenas en la década de 1970, creando áreas muy contaminadas en el acuífero superior del delta y valle bajo. El riego en el delta introdujo, y sigue introduciendo allí donde se practica, excesos de NO_3 que afectan a las aguas subterráneas con valores de hasta 4 veces al límite admisible en el agua de bebida (que es de 50 mg/L NO_3). Este exceso de nutrientes afecta además a los humedales que aún subsisten (que están legalmente protegidos) y a los canales de drenaje (correderas).

Los diferentes cálculos hidrogeoquímicos, con isótopos ambientales y por modelación numérica, indican que en promedio el agua de valle bajo se renueva cada 2 a 3 años, tras un tránsito por el medio no saturado bajo los campos de 1 a 3 años, y una transmisión al acuífero profundo del delta, desde Cornellà a Prat de Llobregat, que tarda unos 10 años. La penetración de agua marina desde el afloramiento submarino hasta la costa actual requiere de 5 a 8 años para llegar. Se dispone de un buen modelo de flujo y transferencia de masa (Vázquez-Suñé et al., 2006), utilizado por la Agencia Catalana del Agua y la Comunidad de Usuarios, además de para avanzar en estudios y ensayar actuaciones.

IMPORTANCIA DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL BAIX LLOBREGAT

El sistema acuífero del Baix Llobregat es una pieza clave para el abastecimiento urbano y para su seguridad ante sequías, emergencias y serios eventos de contaminación del río, junto al resto de elementos hidráulicos y de corrección de la calidad del agua que hoy proveen agua al Área Metropolitana de Barcelona. Su abandono por intrusión marina, mala calidad o cualquier otra razón obligaría a disponer de un elemento regulador –embalse o conjunto de grandes depósitos– y una ampliación de conducciones, cuyo coste en un área tan ocupada por población puede alcanzar varios miles de millones de euros. De ahí la importancia de que siga funcionando, con las medidas de protección necesarias –y no baratas– y la implicación de todos los usuarios y población general del área. El fallo comportaría costear la substitución

(si es posible), con costes de mantenimiento al menos similares. Pero eso necesita la implicación de todos los estamentos administrativos y humanos.

Por otro lado, como ya se ha comentado anteriormente, una recuperación de niveles del agua subterránea por abandono de pozos, y a veces con una recarga incrementada, llevaría –ya ha llevado– a serios problemas de inundación de obras subterráneas, cimientos de edificios y necesidad de mayores drenajes en el aeropuerto y otras áreas.

La importancia del sistema acuífero ha estado muy clara en la mente de los ingenieros de explotación del abastecimiento a Barcelona. Así en la década de 1940 se inició una estimulación de la recarga en la parte alta del valle bajo mediante cuidadoso escarificado del lecho del río. A finales de la década de 1960 se pusieron en operación pozos de recarga en la parte baja del valle bajo, con pozos duales o especialmente dedicados para inyectar excedentes del agua del río, potabilizada en la planta de Sant Joan Despí (Custodio et al., 1977), y actualmente está en proyecto la recarga mediante grandes balsas. A la contención de la intrusión marina en la costa se han dedicado esfuerzos de estudio con instalaciones experimentales de inyección de agua dulce y bombeo de agua salina, y actualmente se trabaja en disponer de una línea de pozos de inyección a lo largo de la costa alimentados con agua residual tratada terciariamente en la planta de Depurbaix, previo un cuidadoso proceso de filtración y disminución de la salinidad por ósmosis inversa. Se ha estudiado como gestionar óptimamente recarga, inyección y bombeo (Abarca et al., 2006).

GESTIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL BAIX LLOBREGAT

El desarrollo de la explotación del agua subterránea en el Baix Llobregat ha sido el resultado de múltiples iniciativas privadas, casi sin control administrativo, al igual que en muchas otras partes del mundo. En el caso del Baix Llobregat, al dominar las extracciones de abastecimiento e industriales la dispersión de iniciativas ha sido menor que en los lugares predominantemente agrícolas, ya que allí el número de usuarios es relativamente pequeño (aunque numeroso) y en estos es muy numeroso. Esto es debido a que la Ley de Aguas de 1886 hacía principalmente referencia a las aguas públicas –las superficiales– dejando las subterráneas en el dominio privado, sin intervenir más que en casos especiales. La Ley de Aguas de 1985 cambió el panorama, declarando todas las aguas de dominio público, pero para evitar expropiaciones e indemnizaciones, a los captadores de agua subterránea se las daba la opción de inscribirlas como públicas voluntariamente, por varias décadas y con una indefinida y poca clara protección administrativa, o bien continuar permanentemente como privadas, sin poder modificar la captación (hay mucha discusión sobre lo que esto quiere decir) salvo la petición de concesión como aguas públicas. La realidad es que la mayoría de usuarios se decidieron por la segunda opción, o no

hacer nada ya que tenían derechos reconocidos por el Código Civil. El resultado ha sido una situación caótica y de continuación del desarrollo ilegal o ilegítimo, aunque en el Baix Llobregat, los grandes extractores se decantaron por la primera opción. Sin embargo, la Administración del agua, ahora la Agencia Catalana del Agua (ACA) no ha podido aún tramitar todas las legalizaciones pedidas, y aún quedan muchas en precario. Está siendo un proceso muy arduo, con numerosos fracasos, a nivel de toda España, pero que ha de solucionarse, ahora por imperativos de la Directiva Marco del Agua Europea (DMA, 2000).

En el Baix Llobregat, su especial tipo de captadores de agua subterránea, mejor relacionados en general (aunque no siempre) y con mucho mayor nivel técnico, tras los detallados estudios llevados a cabo por la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental (predecesora de la ACA) y el (ahora extinto) Servicio Geológico de Obras Públicas, en una jornada técnica que se les preparó en 1972 comprendieron bien la necesidad de gestión, de autolimitación y de protección, contando con la experiencia de Sociedad General de Aguas de Barcelona. Así se propuso la formación de una Comunidad de Usuarios, que se creó en 1975 dentro de la antigua Ley de Aguas de 1886. La experiencia positiva influyó en la Ley de Aguas de 1985, que incluyó la figura de esas comunidades de usuarios de aguas subterráneas como entidades de derecho público.

Dicha comunidad abarca hoy todo el Baix Llobregat (Comunitat d'Usuaris d'Aigua Subterrània del Baix Llobregat, CUADLL), e integra a los agricultores a través de representantes, y funciona de acuerdo con otra comunidad similar en la Cubeta de Sant Andreu de la Barca, justo aguas arriba, creada unos años después. Los efectos en la gestión por los usuarios ha sido de excelentes resultados, eliminando la perforación de pozos ilegales, el vertido de residuos y basuras y la extracción de gravas y arenas, consiguiendo un inventario actualizado de derechos, y llegando a crear un equipo técnico que hoy dispone de varios especialistas y un presupuesto relativamente importante para llevar a cabo su labor (Codina, 2004; Galofré, 1991).

La colaboración técnica con la Administración del agua ha sido en general buena, aunque no tanto en cuestiones de derechos y de voz en las Juntas, para lo que no se estaba aún preparado por continuar actitudes obsoletas y de prerrogativas, que hoy afortunadamente van cediendo.

En todo este proceso el Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea han tenido un papel relevante ya desde la década de 1960.

La correcta gestión de los acuíferos se ha de basar en un buen conocimiento, transmitido a los usuarios. También requiere mejorar las redes de observación, difusión de los resultados, implicación de las instituciones públicas, co-participación y co-responsabilidad de los usuarios, y foros para llegar a acuerdos por consenso.

NOTA FINAL

Los trabajos más importantes se iniciaron en 1964 por impulso del Dr. M. Ramón Llamas con el apoyo de D. José María Llansó de Vinyals, entonces Comisario de Aguas del Pirineo Oriental, y las facilidades dadas para el acceso a sus archivos de pozos del constructor D. Miguel Xartó. En el momento actual el Dr. Jesús Carrera, en la UPC hasta hace poco y ahora en el CSIC, y su equipo han desarrollado la modelación más reciente. En la Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental, hoy Agencia Catalana del Agua, destaca la labor realizada por D. Alfons Bayó y D. Andreu Galofré, y actualmente por D. Josep M^a Niñerola. Además hay que considerar las numerosas tesis defendidas. En la CUADLL es de destacar la labor histórica realizada por D. Josep Ferret y de estudio dirigido por D. Enric Queralt.

BIBLIOGRAFÍA

- Abarca, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, D., Battle, F. (2006). *Optimal design of measures to correct seawater intrusion*. Water Resources Research, 42: doi: 10.1029/2005WR004524.
- Barriandos, M., Martín-Vide, J. (1998). *Secular climatic oscillations as indicated by catastrophic floods in the spanish Mediterranean coastal area (14th–19th centuries)*. Climatic Change, 38: 473–491.
- Bayó, A., Batista, E., Custodio, E. (1977). *Sea water encroachment in Catalonia coastal aquifers*. General Assembly Intern. Assoc. Hydrogeologists. Birmingham U.K., XIII.I: F.1–14.
- Checa, A., Díaz, J.I., Farrán, M., Maldonado, A. (1988). *Sistemas deltaicos holocenos de los ríos Llobregat, Besós y Foix: modelos evolutivos transgresivos*. Acta Geol. Hispánica, 23: 241–255.
- Codina, J. (1971). *Inundacions al delta del Llobregat*. R. Dalmau. Barcelona: 1–68.
- Codina, J. (2004). *Las aguas subterráneas: una visión social. El caso de la Comunidad de Usuarios del Llobregat*. Real Acad. Cien. Exact. Fis. Nat. (Esp). Madrid, 98(2): 323–329.
- Cuena, J., Custodio, E., (1971). *Construction and adjustment of a two layer mathematical model of the Llobregat delta*. Mathematical Models in Hydrology. Proc. IASH-UNESCO-WMO, Warsaw Symposium. 2: 135–155.
- Custodio, E., (1967). *Études hydrogéochimiques dans le delta du Llobregat, Barcelona (Espagne)*. Gen. Assem. Bern, Intern. Assoc. Sci. Hydrol. Publ. 62: 135–155.
- Custodio, E. (1981). *Sea water encroachment in the Llobregat delta and Besós areas, near Barcelona (Catalonia, Spain)*. Sea Water Intrusión Meeting: Intruded and Fossil Groundwater of Marine Origin. Rapp. och Meddelanden, 27. Sveriges Geologiska Undersökning, Uppsala: 120–152.
- Custodio, E., (1983). *El uso conjunto en el Pirineo Oriental: problemas de calidad*. Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, E-8: 1–22.
- Custodio, E., (1987). *Sea-water intrusion in the Llobregat delta, near Barcelona (Catalonia, Spain)*. Groundwater Problems in Coastal Areas, UNESCO Studies and Reports in Hydrology no. 45. UNESCO, París: 436–463.

- Custodio, E. (2002). *Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures*. Groundwater and Human Development. (Eds: E. Bocanegra, D. Martínez, H. Massone). Intern. Assoc. Hydrogeologists, Selected Papers: 1905–1918.
- Custodio, E., Bayó, A., Peláez, M.D. (1971). *Geoquímica y datación de aguas para el estudio del movimiento de las aguas subterráneas en el delta del Llobregat (Barcelona)*. 1er Congreso Hispano-Luso-Americano de Geología Económica, Madrid-Lisboa, 6: 51–80.
- Custodio, E., Llamas, M.R. (eds) (1976; 1983). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona, 2 vols: 1–2350.
- Custodio, E., Suárez, M., Isamat, F.J., Miralles, J.M. (1977). *Combined use of surface and groundwater in Barcelona Metropolitan Area (Spain)*. Intern. Assoc. Hydrogeologists, Gen. Assem. Birmingham, XIII.1: 14–27.
- Custodio, E., Glorioso, L., Manzano, M., Skupien, E. (1989). *Evolución y alternativas de un acuífero sobreexplotado: el Delta del Llobregat*. Sobreexplotación de Acuíferos. Instituto Tecnológico y GeoMinero de España, Granada: 207–227.
- DMA, (2000). *Directiva Marco del Agua*. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. http://europa.eu.778int/eur-lex/priles/oj/dat/2000/l_327/l_32720001222es00010072.pdf
- Ferret, J. (2006). *Els primitius pous artesianes del riu Llobregat, 1889–1912*. Comunitat d'Usuaris d'Aigües de la Vall Baixa i Delta del Llobregat. Prat de Llobregat, Barcelona: 1–89.
- Galofré, A., (1991). *Las comunidades de usuarios de aguas subterráneas: experiencias en la gestión y control de los recursos hidráulicos en Cataluña*. Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva. CIHS/CIMNE. Barcelona: 337–357.
- Gámez, D. (2007). *Sequence stratigraphy as a tool for water resources management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat delta (Barcelona, Spain)*. Tesis doctoral. Dep. Ingeniería del Terreny, Cartogràfica i Geofísica, Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona: 1–177 + An.
- Iribar, V., Carrera, J., Custodio, E., Medina, A. (1997). *Inverse modelling of sea water intrusion in the Llobregat delta deep aquifer*. Journal of Hydrology, 198(1–4): 226–244.
- Llamas, M.R. (1969). *Combined use of surface and ground water for the water supply to Barcelona (Spain)*. Bull. Intern. Assoc. Sci Hydrol., 14(3): 119–136.
- Llamas, M.R., Molist, J. (1967). *Hidrología de los deltas de los ríos Besòs y Llobregat*. Rev. Agua, Barcelona, 2: 139–154.
- Llasat, M.C., Barriendos, M., Barrera, A., Rigo, T. (2005). *Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century*. Climatological and Meteorological Aspects from Historical Documentary Source and Old Instrumental Records. Journal of Hydrology, 313(2): 32–47.
- Manzano, M., (1993). *Génesis del agua intersticial del acuitardo del delta del Llobregat: origen de los solutos y transporte interactivo con el medio sólido*. Tesis doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona: 1–273.
- Manzano, M., Peláez, M.D., Serra, J. (1986–1987). *Sedimentos prodeltaicos en el delta emergido del Llobregat*. Acta Geológica Hispánica, 21–22: 205–211.
- Manzano, M., Custodio, E., Carrera, J. (1992). *Fresh and salt water in the Llobregat delta aquifer: application of ion chromatography to the field data*. Study and Modelling of Saltwater Intrusion Into Aquifers. Intern. Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), Barcelona: 207–228.
- Marqués, M.A. (1975). *Las formaciones cuaternarias del delta del Llobregat*. Acta Geológica Hispánica. X: 21–38.
- Marqués, M.A. (1984). *Las formaciones cuaternarias del delta del Llobregat*. Tesis doctoral. Fac. Cien. Geol., Universidad de Barcelona: 1–280.
- MOP, (1966). *Estudio de los recursos hidráulicos totales de las cuencas de los ríos Besòs y Bajo Llobregat*. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Ministerio de Obras Públicas. Barcelona. 4 vol.
- Peláez, M.D. (1983). *Aplicación de los isótopos ambientales y de la composición química al estudio del movimiento de las aguas a través de los acuitardos del delta del río Llobregat*. Tesis doctoral. Fac. Cien. Físicas, Universidad de Barcelona.
- PHPO, (1985). *Modelo de simulación de los acuíferos del delta del Bajo Llobregat*. Plan Hidrológico del Pirineo Oriental. Confederación Hidrográfica del Pirineo Oriental-Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental. Barcelona.
- REPO, (1971). *Construcción, ajuste y utilización de un modelo matemático de los acuíferos del Bajo Llobregat*. Estudio de los Recursos Hidráulicos Totales del Pirineo Oriental. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas, Barcelona: 1–130.
- Santa María, L., Marín, A. (1910). *Estudios hidrológicos en la cuenca del río Llobregat*. Bol. Com. Mapa Geológico de España, Madrid: 31–52.
- Simó, J.A., Gámez, D., Salvany, J.M., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Barnolas, A., Alcalá, F.J. (2005). *Arquitectura de facies de los deltas cuaternarios del río Llobregat, Barcelona, España*. Geogaceta, 38: 171–174.
- Solé-Sabarís, L., Virgili, C. (1957). *Llivret guide d'excursions: environs de Barcelona et Montserrat*. V Congreso Internacional INQUA, Barcelona: 1–38.
- Vázquez-Suñé, E., Abarca, E., Carrera, J., Capino, B., Gámez, D., Pool, M., Simó, T., Batlle, F., Niñerola, J.M., Ibáñez, X. (2006). *Groundwater modelling as a tool for the European Water Framework Directive (WFD) application: The Llobregat case*. Physics and Chemistry of the Earth, 31(17): 1015–1029.
- Vilaró, F. (1967). *Balance del aprovechamiento actual del Bajo Llobregat*. Doc. Inv. Hidrológica no. 2. Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua. Barcelona: 155–169. ■

Este artículo fue solicitado desde E.C.T. el día 6 de noviembre de 2007 y aceptado definitivamente para su publicación el 5 de junio de 2008.